

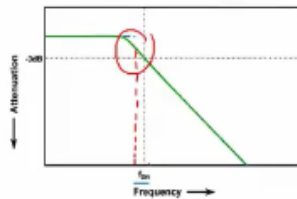
# Ancho de banda de osciloscopios

Usualmente llamamos **ancho de banda de un osciloscopio** (por analogía a la de un cuádrupolo pasabajos ideal) a la frecuencia más baja en donde la amplitud de una **señal mostrada** en la pantalla se **reduce al 70,7%** de la mostrada en una señal de la misma amplitud pero de muy baja frecuencia.

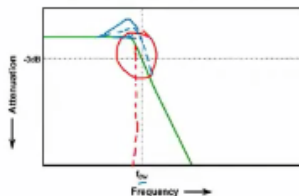
Esta definición es más **limitada** de lo que parece pues presupone que siempre la transferencia es igual a la que presenta un polo simple.

Si bien eso suele ocurrir en osciloscopios de hasta 1 GHz de ancho de banda (Y se dice que tienen respuesta Gaussiana)....

Gaussian Scope Response



Maximally-flat Scope Response



...Los osciloscopios de **ancho de banda mayor** tienen **transferencia más "abrupta"** que la de un polo simple. Se los llama de respuesta extra plana.

Nótese que en estos últimos:

1. la respuesta temporal **NO es exponencial** sino que aparece siempre una respuesta subamortiguada que realmente puede no estar presente en la señal.

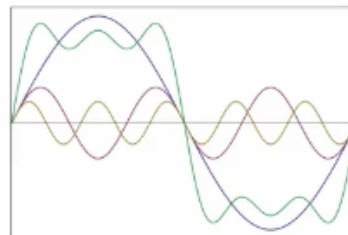
## Ancho de banda necesario de osciloscopios

Si a la frecuencia correspondiente al ancho de banda la señal aparece con un **70 %** del valor de la amplitud real de la tensión entonces:

la incertidumbre vertical declarada (normalmente del orden del 3%) **solo puede ser alcanzada a frecuencias mucho más bajas que la del ancho de banda.**

Simple cálculos permiten ver que **la incertidumbre nominal se alcanza solo a frecuencias de hasta 1/3 del BW nominal**

La situación es más **compleja** si la señal es una onda cuadrada. Sabemos que para representarla en forma más o menos aproximada es necesario que **al menos la 3ra y la 5ta** armónica se consideren (pensando en el desarrollo de Fourier). Para que estas componentes estén medidas con una incertidumbre baja deben estar a frecuencias menores que 1/3 del ancho de banda. Un osciloscopio de 300MHz permitiría ver adecuadamente una onda cuadrada de....20MHz!



## Ancho de banda necesario de osciloscopios

La mayoría de las veces ese ancho de banda es aún **insuficiente** porque lo que **se desea medir en correctamente son los tiempos de transiciones** de la señal.

Una **regla práctica** para medir señales con un tiempo de transición RT es calcular  $f_{knee}$

Calculate  $f_{knee}$

$$f_{knee} = 0.5/RT \text{ (10% - 90%)}$$

$$f_{knee} = 0.4/RT \text{ (20% - 80%)}$$

Luego se debe elegir un osciloscopio cuyo ancho de banda sea entre **1 y 1,9 veces mayor** que  $f_{knee}$  **según la incertidumbre deseada:**

Required Accuracy	Gaussian Response	Maximally-flat Response
20%	$BW = 1.0 \times f_{knee}$	$BW = 1.0 \times f_{knee}$
10%	$BW = 1.3 \times f_{knee}$	$BW = 1.2 \times f_{knee}$
3%	$BW = 1.9 \times f_{knee}$	$BW = 1.4 \times f_{knee}$

## Ancho de banda necesario de osciloscopios

Ejemplo:

Determinar el BW mínimo requerido del osciloscopio con una respuesta gaussiana para medir un rise time de 500ps (10-90%)

Se calcula:

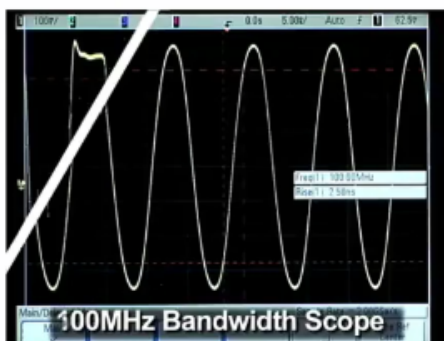
$$f_{\text{knee}} = (0.5/500\text{ps}) = \underline{1\text{GHz}}$$

Y, en función de la incertidumbre, requerida resultan varias opciones:

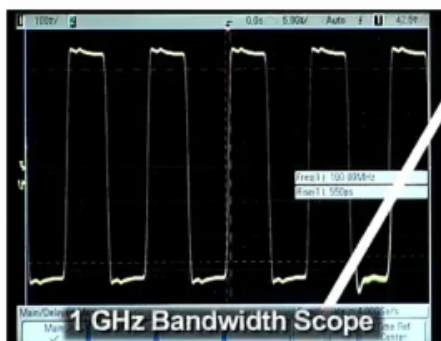
20% Accuracy: Scope Bandwidth =  $1.0 \times 1\text{GHz} = \underline{1.0\text{GHz}}$

3% Accuracy: Scope Bandwidth =  $1.9 \times 1\text{GHz} = \underline{1.9\text{GHz}}$

## Ancho de banda necesario de osciloscopios



Osciloscopio 500MHz



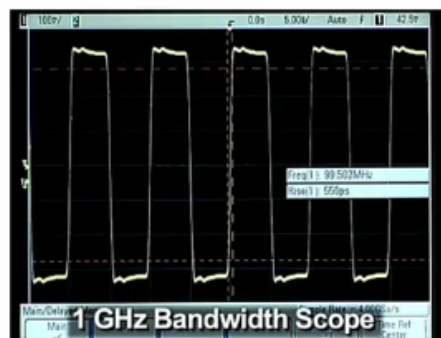
Osciloscopio de 1 GHz

## Ancho de banda necesario de osciloscopios

Veamos un ejemplo de la medición de una onda cuadrada de 100MHz



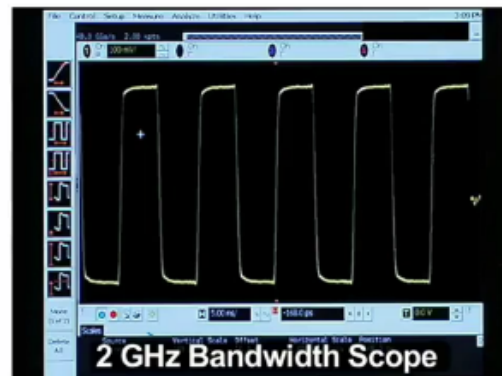
Osciloscopio 500MHz



Osciloscopio de 1 GHz

## Ancho de banda necesario de osciloscopios

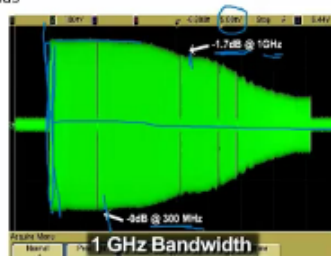
Veamos el mismo ejemplo con un osciloscopio de 2 GHz



## Detalles sobre el BW del osciloscopio

Cuando usamos un **SOLO número** para definir el ancho de banda implícitamente **asumimos que la transferencia es plana** hasta caer 3 dB en esa frecuencia.

Si eso no es cierto debemos prestar atención a los componentes de la señal y la “ganancia” a cada una de esas frecuencias



En este ejemplo se compara la respuesta en frecuencia hallada con el modo roll y un generador de barrido de dos osciloscopios de 1 y 1,5GHz de BW. En el primero la caída a la frecuencia del BW es solo 1.7dB (tiene margen) pero además a 1/3 del BW la respuesta es esencialmente plana.

El otro osciloscopio aparentemente mejor por el mayor BW presenta una **transferencia con picos y valles de hasta 2,6dB** en la banda útil lo que lo hace, al menos, dudoso para medir señales que tengan componentes distribuidos en distintas frecuencias.

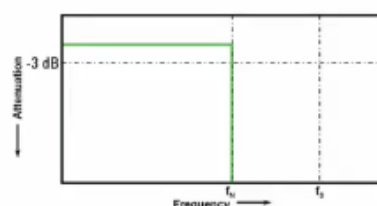
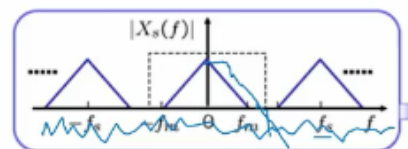
## Ancho de banda y Frecuencia de Muestreo

El teorema de Nyquist establece que para reconstruir una señal es necesario muestrearla a una frecuencia igual al doble de la frecuencia máxima presente en ella.

El teorema tiene un corolario que a menudo se toma a la ligera:

**El algoritmo de reconstrucción de la señal original exige que las muestras sean equiespaciadas.**

Sabemos también que el **espectro de la señal muestreada** presenta réplicas idénticas a la de la señal no muestreada alrededor de la frecuencia de muestreo y sus múltiplos.

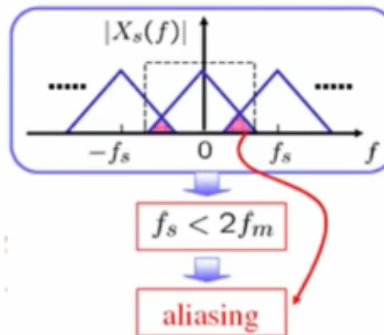


El teorema parte de una **hipótesis de cumplimiento imposible**: Que la señal no tenga contenido energético por encima de la frecuencia máxima.

Esa condición es imposible de cumplir porque **exigiría tener inmediatamente antes de la digitalización un cuádruplo de transferencia “rectangular” irrealizable** en la práctica.

## Ancho de banda y Frecuencia de Muestreo

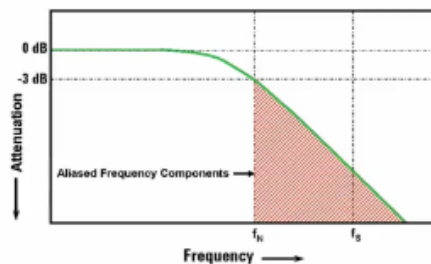
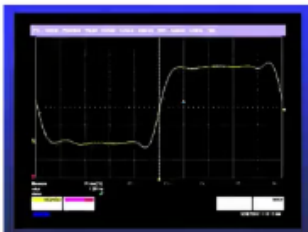
En el mundo real **no existen señales limitadas en banda** en forma absoluta por lo que **nunca es posible** muestrear de modo que no haya un solapamiento entre los alias.



Ese problema tiene diferentes soluciones prácticas

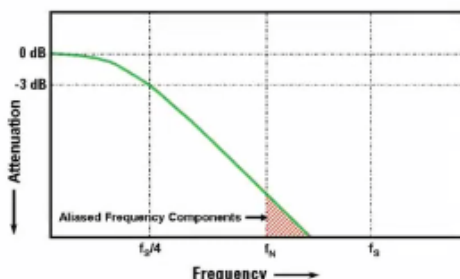
## Ancho de banda y Frecuencia de Muestreo

La mayoría de los osciloscopios de hasta 1 GHz de ancho de banda tienen una respuesta de un polo simple en su parte analógica. Si ciegamente se muestrea con una frecuencia del doble de **ESE** ancho de banda hay un **solapamiento muy significativo** de los alias con el espectro original.



En el dominio del tiempo la interacción entre el espectro original y el alias se manifiesta como una "inestabilidad temporal" en las zonas de la forma de onda que están relacionadas con la alta frecuencia (los flancos en este video) (tiene que ver con fases no coherentes entre las componentes de uno y otro)

## Ancho de banda y Frecuencia de Muestreo



Para mitigar ese problema la solución pasa por muestrear a frecuencias lo suficientemente altas como para que la superposición de los alias ocurra con componentes de la señal que están tan atenuados por la transferencia misma de la parte analógica que casi no es perceptible por la resolución misma de los conversores A/D

**En los osciloscopios de transferencia gaussiana típicamente se utiliza una frecuencia 4 veces mayor a la del polo de la transferencia del circuito analógico de entrada. Eso asegura una mínima perturbación (no nula).**

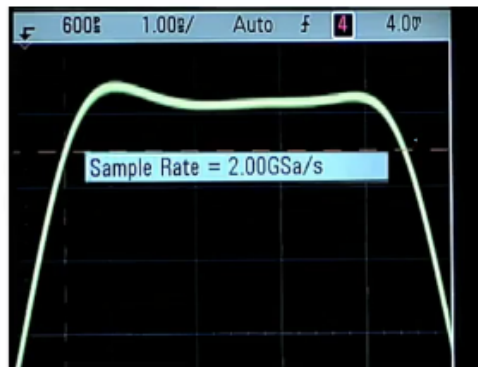


## Ancho de banda y Frecuencia de Muestreo

En este osciloscopio de 500 Mhz se puede seleccionar entre muestrear a 2 Gsa/s y 4 Gsa/s. Observemos una señal de 100MHz

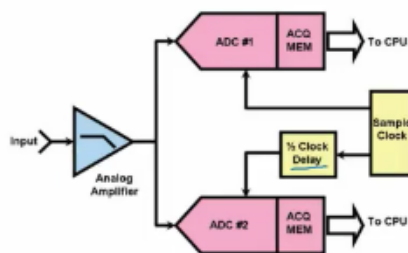
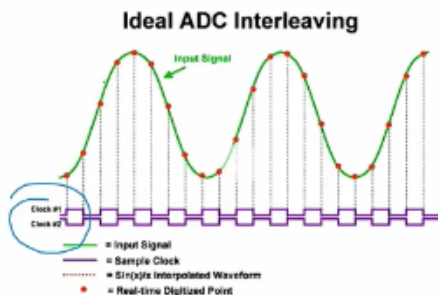
Se observa que muestrear 4 veces más rápido que el BW del osciloscopio da una forma de onda aceptable

Hacerlo 8 veces más rápido que el ancho de banda produce una ligera mejora en la adquisición de la forma de onda pero no es demasiado significativa y solo **impacta mínimamente** en las transiciones más rápidas.



## Distorsión por Entrelazado de los conversores

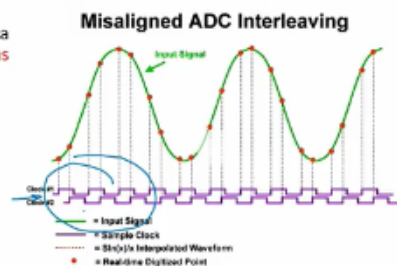
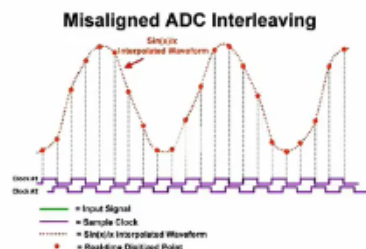
Para **aumentar la frecuencia** de adquisición ya hemos visto que se recurre al uso de **múltiples conversores** relativamente lentos sincronizados entre sí y "entrelazando" las muestras obtenidas.



En el **caso ideal** el sincronismo deberá lograr que las muestras estén **equiespaciadas**. La reconstrucción definida por el algoritmo del teorema en ese caso va a coincidir con la señal original.

## Distorsión por Entrelazado de los conversores

El sincronismo es **difícil** de obtener y se complica con el entrelazado de muchos conversores. **Si las muestras no están equiespaciadas.....**



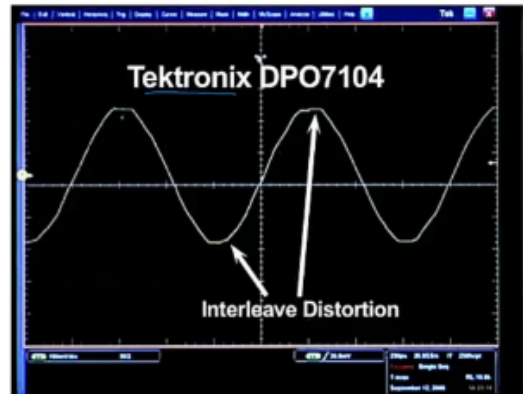
Pero el algoritmo de reconstrucción siempre **SUPONE** que **Sí están equiespaciadas** por lo que la reconstrucción **NO COINCIDE** con la señal original.

Este análisis se limita a un desajuste en la posición temporal de las muestras. La **situación empeora** en forma similar si los **conversores no** están muy exactamente **matcheados** entre sí

Para el mismo valor de tensión analógica, "convierten" a un valor digital diferente. Eso es **más notable** cuanto **más rápida es la señal** pues el ENOB en función de la frecuencia de todos los conversores entrelazados puede ser ligeramente diferente.

## Observación de la distorsión por entrelazado

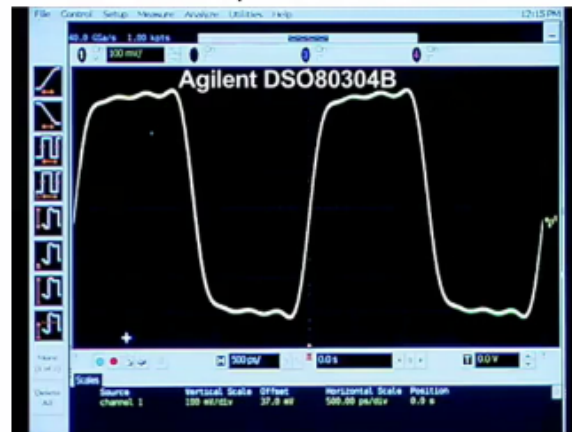
El Entrelazado groseramente incorrecto se pone de manifiesto claramente en la imagen de la sinusoide que es la señal de entrada.



## Observación de la distorsión por entrelazado

El efecto del mal entrelazado también se percibe en forma un poco más indirecta cuando se está observando una onda cuadrada.

En esta comparación se contrasta el desvío estándar de los tiempos de crecimiento y su variación con la velocidad de muestreo y el incorrecto entrelazado



## Modos de adquisición

**Modo normal:** se digitaliza a una velocidad que está definida por la base de tiempo. Puede ser mucho menor que la máxima. Limita la cantidad de memoria necesaria

**Modo promediado:**

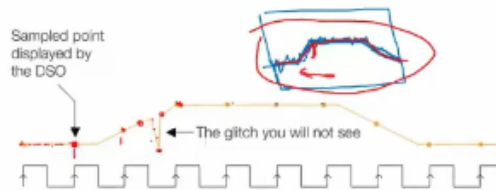
Se hace un promedio móvil de adquisiciones sucesivas. Hace disminuir el efecto de cualquier señal aleatoria superpuesta. No requiere más memoria que el caso anterior

**Modo detección de pico:**

Se digitaliza a la máxima velocidad pero en el tiempo de muestreo del modo normal solo se guardan 2 valores: el máximo y el mínimo de entre todas las muestras adquiridas. Permite ver perturbaciones más cortas que el tiempo entre muestras del modo normal pero más largas que el tiempo mínimo de muestreo. La memoria necesaria solo es algo mayor que el doble de la anterior

**Modo alta resolución:**

Se digitaliza SIEMPRE a la máxima velocidad. Si la velocidad necesaria fuera menor (menos puntos) cada punto a mostrar será el promedio de todas las muestras adquiridas en el tiempo de muestreo del modo normal. A bajas velocidades permite un aumento APARENTE del número de bits del conversor. Se requiere más memoria

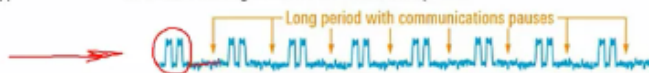


## Modos de adquisición

**Memoria segmentada:**

Se almacenan las muestras a la máxima velocidad pero no en forma continua sino solo cuando la señal presenta "cambios". Permite ahorrar memoria en situaciones con señales rápidas pero con tiempos de inactividad largos

**Protocol-based signal with communications pauses**



**Single-shot acquisition**

Conventional single-shot acquisition Missed acquisition due to limited memory



**Acquisition using segmented memory**

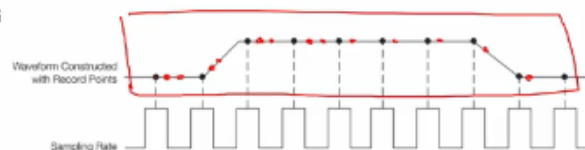


**Analysis of each segment using the history function**

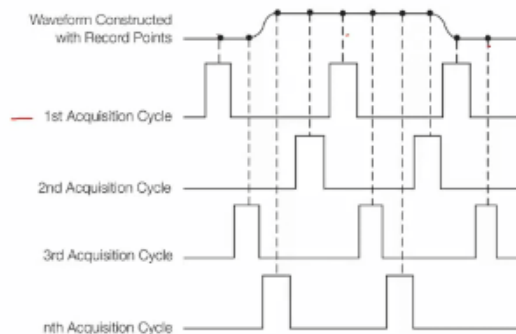


## Tiempo real y tiempo equiv;

El muestreo explicado hasta ahora es el llamado de tiempo real



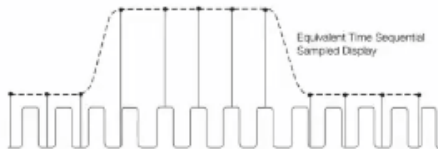
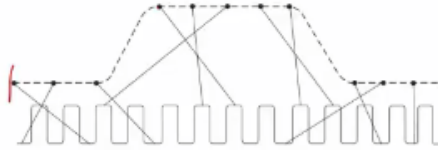
Waveform Constructed with Record Points



Si la señal es repetitiva sería posible tomar muestras más separadas (que las indicadas por las necesidades de la reconstrucción) pero agrupándolas luego en un solo "conjunto". Ese submuestreo "alivia" la exigencia sobre la velocidad de muestreo pero agrega la de la repetitibilidad. Se denomina de "tiempo equivalente" al muestreo así realizado pues equivale a tener mayores velocidades de muestreo.

## Muestreo en tiempo equivalente aleatorio o secuencial

**Tiempo equivalente con muestreo aleatorio:**  
Se muestrea en forma coherente con un clock interno no correlacionado con la señal y se "recuerda" el retardo de cada muestra respecto de una referencia para poder reconstruir la señal. Es el modo más comúnmente encontrado.

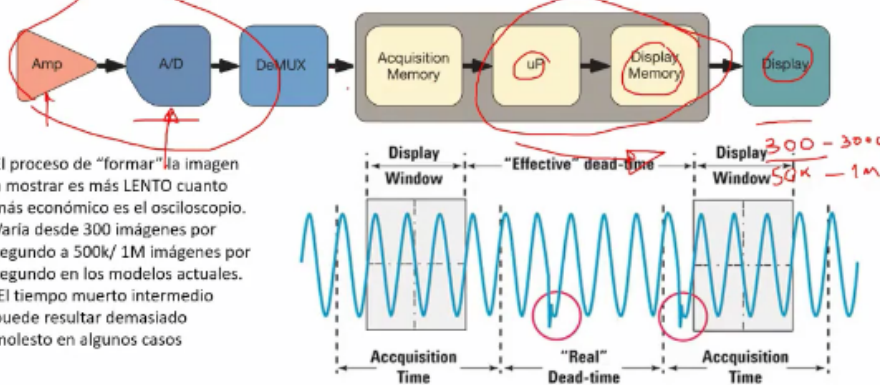


**Tiempo equivalente con muestreo secuencial:**  
Se muestrea con retardos crecientes respecto de un referencia temporal (trigger). Cada muestra representa el estado de la señal en tiempos crecientes.

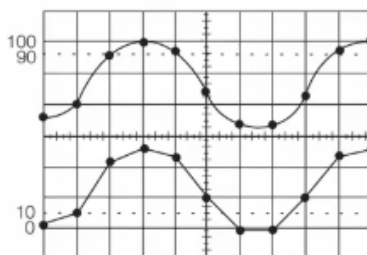
## Modos de display

La información adquirida se debe mostrar en el display.

Si bien en principio lo único necesario es mostrar las muestras adquiridas lo normal es que hay un proceso intermedio. La memoria de adquisición almacena las muestras crudas (o eventualmente con un proceso básico inicial) pero NO es la misma que la que contiene las "imágenes".



## Modos de display



Sucesivas imágenes pueden "reemplazar" a la anterior o graficarse en forma superpuesta. Si reflejamos con distintos tonos o colores la cantidad de "veces" que hubo superposiciones en cada punto de la pantalla decimos que tenemos un display de "fósforo digital".

Si los puntos adquiridos para "una pantalla" son muchos se los puede simplemente graficar (los llamamos dot displays).

Si son menos se los puede interpolar linealmente al mostrarlos (vector displays).

Se puede también usar el algoritmo de reconstrucción del teorema de Nyquist-Shannon (series de sen x/x).





## Procesamiento

Una vez almacenada la señal en forma digital es sencillo obtener parámetros analíticos tales como:

- Valor medio
- Valor pico positivo, negativo o pico a pico
- Valor eficaz
- Histograma de amplitudes
- Integral y derivada de las señales
- Delay entre señales de dos canales

.....

Son unos 30/40 datos adicionales que se pueden leer directamente en pantalla.

Nota **IMPORTANTE**: En general (hay excepciones para los equipos de mayor precio) los parámetros se calculan sobre la imagen **presente en la pantalla**.